

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБОВ ПРИОРИТЕТА АВТОБУСАМ ПРИ ПРОЕЗДЕ ПЕРЕКРЕСТКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СВЕТОФОРАМИ

Д. А. Захаров¹, А. В. Писцов²

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

¹ e-mail: zaharovda@tyuiu.ru

² e-mail: pistsovav@tyuiu.ru

Аннотация. В последние годы в городах Российской Федерации в рамках национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги» активно реализуется концепция «приоритетного развития общественного транспорта» и создаются Интеллектуальные транспортные системы. В статье рассматриваются способы приоритета общественному транспорту при проезде перекрестков с использованием адаптивного управления светофором как возможный альтернативный вариант полосы для маршрутных транспортных средств.

Целью исследования является снижение потерь времени участников дорожного движения за счет определения оптимальных способов приоритета автобусам при проезде регулируемых перекрестков с учетом количества пассажиров в общественном транспорте и потерь времени для всех участников движения.

При проведении исследования применялись методы натурного наблюдения, математическое и имитационное моделирование. Проведен учет моментов подхода автобусов к регулируемому перекрестку и анализ потерь времени автобусов при проезде участка на центральной улице Тюмени. Научная новизна заключается в установлении зависимостей средней скорости движения автобуса на подходе к перекрестку от момента до окончания разрешающего сигнала светофора, времени задержки автобусов от их количества и момента остановки при проезде перекрестка.

С помощью имитационного микромоделирования установлена зависимость времени задержки автобусов и автомобилей от интенсивности движения по пяти вариантам приоритета общественному транспорту. Два варианта приоритета автобусам при проезде перекрестков основаны на способах адаптивного управления светофорами и алгоритмах «раннее включение» и «продление зеленого». Применение выделенной полосы и способа «Раннее включение» при высокой интенсивности движения автомобилей снижает время задержки автобусов на 94%, для личного автотранспорта – увеличивает на 85%. При небольшой интенсивности движения время задержки изменяется на 11 и 6% соответственно для автобусов и автомобилей. Использование способа «Продления зеленого» позволяет снизить общее время задержки на 3,2% при высокой интенсивности движения автомобилей (1900 ТС/ч) и малом количестве автобусов (40 ТС/ч) и дает больший эффект, чем полоса для маршрутных транспортных средств (ухудшение на 148%).

Для определения наиболее эффективного способа приоритета предлагается учитывать количество пассажиров в общественном транспорте. Установлена зависимость общего времени задержки всех участников движения от интенсивности движения автомобилей и автобусов при различных способах приоритета. Такой подход позволяет в дальнейшем определить область рационального применения способов приоритета общественному транспорту с целевой функцией снижения потерь времени всех участников движения.

Ключевые слова: общественный транспорт, автомобили, автобусы, интеллектуальные транспортные системы, адаптивное управление светофорным объектом, транспортное моделирование.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Тюменской области в рамках научного проекта № 20-48-720006 «Модель трансформации городских транспортных систем с учетом влияния на общество и экономику пандемии коронавируса Covid-19».

Для цитирования: Захаров Д. А., Писцов А. В. Анализ эффективности способов приоритета автобусам при проезде перекрестков с применением адаптивного управления светофорами // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2022. – № 4. – С. 128–139, <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-4-128>.

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF BUS PRIORITY METHODS WHEN PASSING THROUGH INTERSECTIONS USING ADAPTIVE TRAFFIC LIGHT CONTROL

D.A. Zakharov¹, A.V. Pistsov²

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

¹ e-mail: zaharovda@tyuiu.ru

² e-mail: pistsovav@tyuiu.ru

Abstract. In recent years in the cities of the Russian Federation, within the framework of the national project “Safe and high-quality roads” the concept of “priority development of public transport” has been actively implemented and Intelligent transport systems have been created. The article discusses ways to prioritize public transport when passing through intersections using adaptive traffic light control as a possible alternative to a lane for route vehicles.

The aim of the study is to reduce the loss of time for road users by determining the best ways to prioritize buses when passing regulated intersections, taking into account the number of passengers in public transport and the loss of time for all traffic participants.

During the study, field observation methods, mathematical and simulation modeling were used. The account of the moments of the approach of buses to the regulated intersection and the analysis of the loss of time for buses when passing through the section on the central street of Tyumen was carried out. The scientific novelty lies in establishing the dependencies of the average speed of the bus on the approach to the intersection from the moment until the end of the traffic signal, the delay time of the buses on the number and moment of stopping the buses when passing the intersection.

With the help of simulation micromodeling, the dependence of the delay time of buses and cars on traffic intensity was established for five options for priority to public transport. Two variants of priority for buses when passing through intersections are based on the methods of adaptive control of traffic lights and the algorithms “stage recall” and “green extension”. The use of a dedicated lane and the “stage recall” method at high traffic intensity reduces the delay time for buses by 94%, for personal vehicles – increases by 85%. At low traffic intensity, the delay time changes by 11 and 6%, respectively, for buses and cars. The use of the “green extension” method allows to reduce the total delay time by 3.2% with a high traffic volume (1900 veh/h) and a small number of buses (40 veh/h) and has a greater effect than the lane for fixed-route vehicles (deterioration by 148%).

To determine the most efficient priority method, it is proposed to take into account the number of passengers in public transport. The dependence of the total delay time of all traffic participants on the traffic intensity of cars and buses with different priority methods has been established. This approach allows us to further determine the area of rational application of priority methods for public transport with the target function of reducing the loss of time for all traffic participants.

Key words: public transport, cars, buses, intelligent transport systems, adaptive control of a traffic light object, transport modeling.

Acknowledgements. The research was funded by RFBR and Tyumen Region, number 20-48-720006 «Model for the transformation of urban transport systems with considering the impact on society and the economy of the Covid-19 coronavirus pandemic».

Cite as: Zakharov, D. A., Pistsov, A. V. [Analysis of the efficiency of bus priority methods when passing through intersections using adaptive traffic light control] *Intellekt. Innovacii. Investicii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 4, pp. 128–139, <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-4-128>.

Введение

В последние годы Министерство транспорта России активно поддерживает проекты по развитию в городах общественного транспорта (ОТ) и интеллектуальных транспортных систем (ИТС). Развитие данных направлений в комплексе с мероприятиями концепции «Мобильность как услуга» (MaaS) направлено на обеспечение устойчивой мобильности в городах. Успешное развитие концепции MaaS зависит от качественной работы и уровня развития общественного транспорта [12]. Высокое качество пассажирских перевозок в городском общественном транспорте необходимо для уменьшения доли использования личного транспорта в структуре подвижности населения. Эффективность работы общественного транспорта зависит от связности территорий, плотности улично-дорожной сети (УДС) и маршрутной сети. Значительное улучшение данных параметров требует больших финансовых затрат и организационно-управленческих усилий. Другим способом повышения эффективности

организации дорожного движения, в том числе общественного транспорта, является развитие Интеллектуальных транспортных систем [10, 6].

Многочисленные социологические опросы показывают, что одной из важнейших причин выбора для поездок личного автотранспорта и отказа от использования общественного транспорта является меньшая скорость сообщения и большие затраты времени на реализацию корреспонденций общественным транспортом в сравнении с использованием личных автомобилей [1, 2]. В работе [8] показано, что наибольшее влияние на выбор жителями Оренбурга способа передвижения оказывают факторы, характеризующие временные свойства, в том числе фактор «Продолжительность поездки на общественном транспорте существенно меньше времени поездки на легковом автомобиле». Снижение времени поездки на общественном транспорте ведет к повышению доли поездок на нем и за счет этого уменьшается загруженность улично-дорожной сети [5].

Обзор литературы

Применение приоритета общественному транспорту при проезде перекрестков позволяет снизить потери времени пассажиров и обеспечить движение автобусов по расписанию, улучшить информированность пассажиров на остановках о времени прибытия автобуса [16, 4]. Приоритет проезда перекрестков автобусам также применяется для сдерживания подвижного состава общественного транспорта с целью исключения их скопления на остановочном пункте за перекрестком [19].

Помимо положительного эффекта для общественного транспорта от применения приоритета проезда перекрестков отмечаются ухудшения параметров дорожного движения для других категорий транспортных средств (ТС), в том числе для ТС, движущихся по пересекающимся с общественным транспортом направлениям [13, 18]. В работе [15] рассмотрены 2 сценария приоритета проезда перекрестков трамваями: unconditional priority; conditional priority в сравнении с вариантом «do nothing». Для рассматриваемого участка безусловный приоритет приводит к значительным ухудшениям и потере времени для всех участников движения. Применение условного приоритета позволило снизить потери времени.

В работе [14] рассмотрен приоритет проезда общественного транспорта по выделенной полосе с дополнительным сигналом светофора (пред-сигналом). В исследовании учитывались интенсивность движения автомобилей и автобусов, а также количество пассажиров в общественном транспорте.

Создание выделенной полосы для общественного транспорта позволяет повысить скорость сообщения, особенно в часы пик. Она позволяет подъехать автобусу к перекрестку, то есть, снизить потери времени даже без изменения параметров светофорного регулирования [7]. В межпиковое время, когда нет затруднений движения автобусов между перекрестками, снизить потери времени при движении общественного транспорта можно с использованием приоритета при проезде перекрестков. Особенно это актуально для регулируемых пересечений с многофазными режимами и длительным циклом работы светофоров с фазовыми коэффициентами менее 0,2 по отдельным подходам к перекрестку.

Среди способов предоставления приоритета общественному транспорту при проезде перекрестков выделяют три наиболее распространенных [11], при применении которых было получено снижение времени задержки до 21 %:

1) Green Extension. Способ применяется при условии, если автобус не успевает проехать стоп-линию на разрешающий сигнал светофора и фаза продлевается на время, необходимое для проезда автобуса через перекресток.

2) Stage Recall. Способ применяется при усло-

вии, если перед перекрестком в момент запрещающего сигнала светофора накапливается заранее заданное количество автобусов и разрешающий сигнал включается раньше запланированного в базовом варианте циклограммы.

3) Stage Skipping. При данном способе для обеспечения движения автобусов изменяется порядок фаз цикла светофорного регулирования.

Приоритет проезда перекрестков в сочетании с дополнительными дорожными знаками и разметкой позволяет реализовать приоритет для автобусов, которые движутся не только по отдельным направлениям, но и по отдельной полосе движения. Такой пример применения технологии «tandem design» приводится в работе [17] для автобусов, совершающих на перекрестке левый поворот.

Для оценки эффективности применяемых алгоритмов при создании приоритетов движения общественному транспорту применяется имитационное моделирование [3, 9].

В данном исследовании рассматриваются наиболее распространенный тип транспортных средств городского наземного транспорта – автобус. В структуре транспортных средств пассажирского транспорта, по данным Минтранса России, автобусы занимают 81,5%. Для городов, не имеющих внеуличного транспорта, данная проблема снижения потерь времени пассажиров общественного транспорта, двигающегося по дорогам общего пользования, является наиболее актуальной.

Целью исследования является снижение потерь времени участников дорожного движения за счет определения оптимальных способов приоритета автобусам при проезде регулируемых перекрестков с учетом количества пассажиров в общественном транспорте и потерь времени для всех участников движения.

Теоретические исследования

Общее время движения автобуса на участке УДС, включающем остановочный пункт и перегон до перекрестка с полосой для маршрутных транспортных средств, складывается из трех временных интервалов, связанных с отдельными процессами: посадкой и высадкой пассажиров на остановочном пункте, движением от остановочного пункта до перекрестка, ожиданием разрешающего сигнала светофора для проезда перекрестка (далее время задержки).

Формирование потерь времени автобусов при проезде перекрестков зависит от момента прибытия автобуса относительно общей продолжительности цикла. Чем раньше относительно начала запрещающего сигнала прибывают автобусы ($t_i' > t_i$) и чем их больше, тем больше суммарное время задержки автобусов ($t_i' < t_i$) за цикл светофорного регулирования.

Суммарное время задержки ($T_{sj}^{от}$) – это сумма потерь времени на момент начала разрешающего сигнала при проезде перекрестка n -го количества

автобусов в j -ом цикле светофорного регулирования, подошедших к стоп-линии, соответственно, в моменты времени $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ (рис. 1).

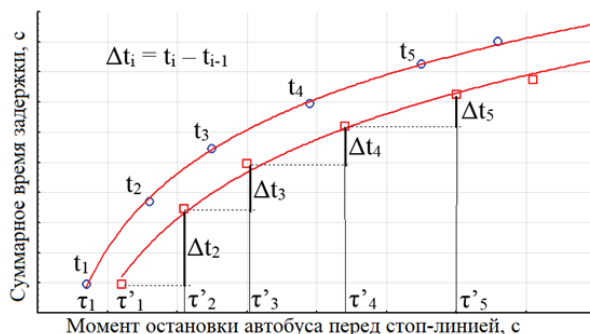


Рисунок 1. Закономерность формирования суммарного времени задержки общественного транспорта при проезде перекрестков

Источник: разработано авторами

Гипотеза о виде математической модели: зависимость суммарного времени задержки остановки автобусов при проезде перекрестков описывается логарифмической математической моделью (1) и имеет некоторые характеристики.

1. Темп прироста суммарного времени задержки снижается с остановкой каждого следующего

автобуса, так как для него время задержки остановки меньше по сравнению с показателем у предыдущего автобуса ($\Delta t_j > \Delta t_{j+1}$).

2. Количество автобусов (n_j), остановившихся перед стоп-линией на запрещающий сигнал светофора, в каждом цикле (j) изменяется в диапазоне $[1; n_{max}]$.

$$T_{sj}^{от} = a \cdot \ln(b \cdot \tau_i) \quad (1)$$

где

τ_i – момент остановки перед стоп-линией i -го автобуса относительно начала запрещающего сигнала светофора в j -ом цикле работы светофора, с;

Δt_j – прирост суммарного времени задержки при остановке перед стоп-линией i -го автобуса, с.

Суммарное время задержки $T_{sj}^{от}$ определяется на момент окончания запрещающего сигнала светофора и находится в интервале $(0, Y_{max})$, а момент подхода к стоп-линии в период запрещающего сигнала (x_{min}, x_{max}).

Наибольшая доля в суммарном времени задержки приходится на время задержки первого остановившегося автобуса, так как у него наибольшее время ожидания разрешающего сигнала светофора. В случае предоставления приоритета движению данному автобусу возможно существенно сократить накопленное время задержки остановки за период запрещающего

сигнала. При меньшем количестве автобусов, остановившихся на запрещающий сигнал светофора, суммарное время задержки будет меньше.

Модель 1 определяет суммарное время задержки на момент начала разрешающего сигнала и не позволяет учитывать непрерывность процесса формирования потерь времени с момента остановки первого автобуса в цикле. Для этого предлагается использовать показатель время задержки (формула 2), который характеризует потери времени n -го количества автобусов на момент времени t , ожидающих включения разрешающего сигнала светофора.

$$T'_{sj}^{от} = a \cdot e^{b \cdot \tau}. \quad (2)$$

Муниципальным властям и организаторам перевозок в рамках обеспечения транспортного обслуживания населения необходимо решить задачу минимизации времени задержки всех участников движения ($T_s \rightarrow min$).

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводились в два этапа: натурные наблюдения и имитацион-

ное моделирование. Наблюдения проводились на главной улице Тюмени, относящейся к магистральной улице регулируемого движения с полосой для маршрутных транспортных средств, и определялся момент остановки автобуса перед перекрестком в течение цикла работы светофора. На участке протяженностью 134 м в вечерний «час пик» 68% автобусов подошли к стоп-линии на запрещающий сигнал светофора. Для этих автобусов сформировалось

время задержки остановки (рис. 2). На данный вид потерь приходится 43% от общего времени движения автобусов, 20% времени приходится на движе-

ние автобусов и 37% на посадку/высадку пассажиров на остановочном пункте.

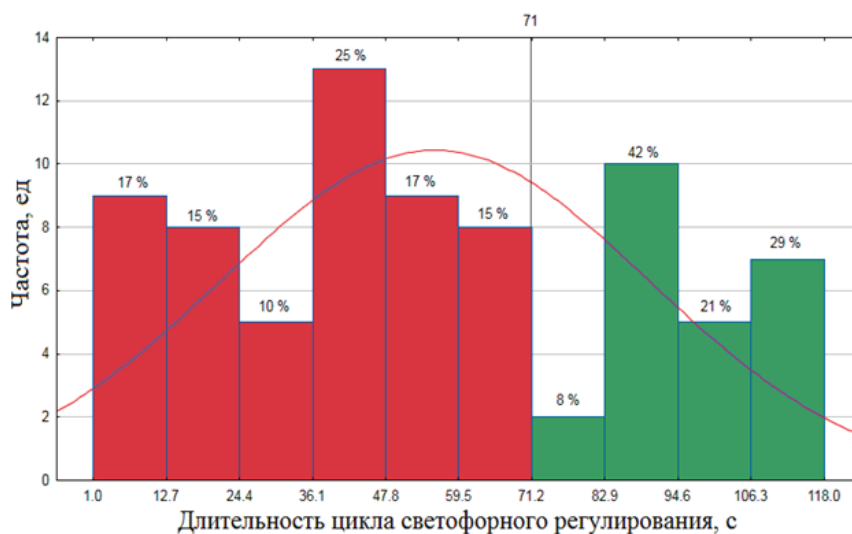


Рисунок 2. Моменты остановки автобусов перед стоп-линией на перекрестке в период цикла светофорного регулирования

Источник: разработано авторами

В работе рассматриваются методы для снижения потерь времени автобусов и пассажиров при проезде регулируемого перекрестка. Подход автобусов к стоп-линии неравномерен и значительная часть остановившихся автобусов (25%) подошла в середине цикла (с 36 по 47 с). Во второй половине интервала запрещающего сигнала перед стоп-линией остановилось 57% автобусов.

Из общего числа автобусов, которые проехали перекресток без остановки перед стоп-линией, в последнюю четверть основного такта пересекли стоп-линию 29% автобусов. При этом наблюдается

корреляция между скоростью движения автобусов перед перекрестком и моментом подхода автобуса к стоп-линии относительно начала цикла работы светофора (рис. 3).

Чем меньше времени остается до включения запрещающего сигнала светофора, тем выше скорость движения автобуса для того, чтобы успеть проехать перекресток на разрешающий сигнал без остановки и потерь времени. Увеличение скорости автобусами возможно за счет движения по выделенной полосе и отсутствием на ней других транспортных средств.

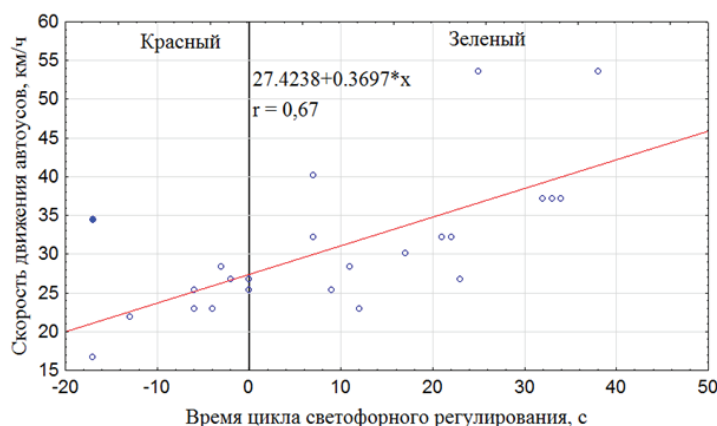


Рисунок 3. Зависимость средней скорости движения автобусов от момента подхода автобуса к стоп-линии в период цикла светофорного регулирования

Источник: разработано авторами

Несмотря на наличие выделенной полосы для ОТ и увеличение скорости в 1,5–2 раза, часть автобусов (17%) подошла к стоп-линии в течение первых 10 секунд запрещающего сигнала светофора. При относительно небольшом продлении разрешающего сигнала возможно уменьшить количество автобусов, проезжающих перекресток с наибольшими потерями времени из-за остановки на запрещающий сигнал светофора.

Для проверки гипотезы о виде математической модели (формула 2) был выбран участок УДС с регулируемым перекрестком в г. Тюмени и проведены наблюдения в вечернее время в период максимальной интенсивности движения транспорта. Участок характеризуется наличием выделенной полосы для

движения автобусов на подходе к Х-образному перекрестку. Во время наблюдения фиксировались моменты входа автобусов на участок, момент пересечения или остановки на подходе к перекрестку. Длительность цикла светофорного регулирования 121 с, фазовый коэффициент для направления с маршрутами движения автобусов 0,41, длительность запрещающего сигнала – 71 с. Интенсивность движения автобусов на рассматриваемом участке – 152 ТС/ч. Зависимость времени задержки от момента остановки перед стоп-линией описывается экспоненциальным уравнением (рис. 4), что подтверждает гипотезу о виде математической модели (формула 2).

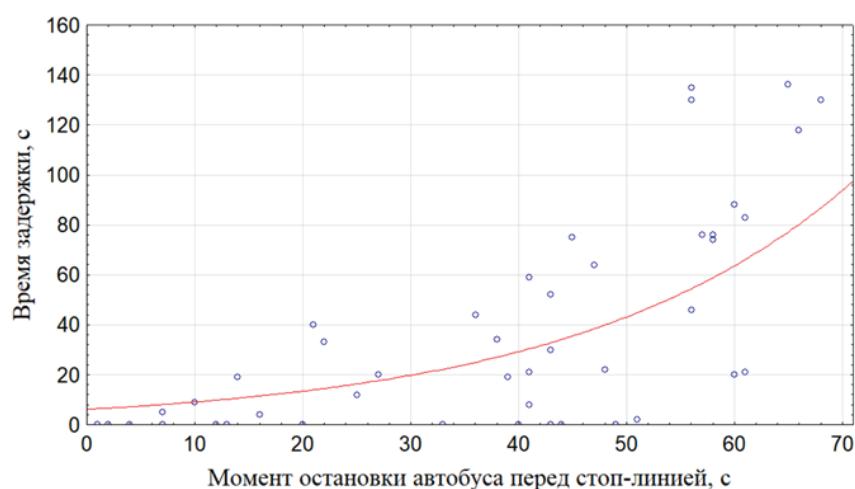


Рисунок 4. Зависимость времени задержки автобусов от момента остановки перед стоп-линией
Источник: разработано авторами

Расчетным способом установлено, что при применении на рассматриваемом участке способа «Продление зеленого» с добавлением 12 с к разрешающему сигналу светофора время задержки автобусов за один час снижается на 1176 с. При увеличении основного такта на 12 с использованием способа «Раннее включение» – время задержки автобусов уменьшается на 1184 с. Можно говорить об одинаковом эффекте от применения обоих способов приоритета для автобусов. При этом необходимо оценить изменения времени задержки для других участников дорожного движения.

Для оценки эффективности различных способов приоритета была создана модель регулируемого Х-образного пересечения двух магистральных улиц регулируемого движения при стандартных настройках программы в соответствии с руководством пользователя PTV VISSIM. Сигнальный план светофорного объекта состоит из трех фаз: две для движения транспорта и одна для пешеходов.

В транспортной модели рассматривается наземный городской общественный транспорт (авто-

бус, троллейбус), маршруты которого проложены по автомобильным дорогам общего пользования. Автомобили-такси в работе не учитывались. Интенсивность движения автомобилей изменялась от 1600 до 2060, а автобусов – от 20 до 120 ТС в час на каждом подходе к перекрестку.

В ходе моделирования была создана базовая модель и рассмотрены 2 способа приоритета автобусам при проезде перекрестков за счет адаптивного управления светофором и вариант с полосой для маршрутных транспортных средств. С учетом базовой модели, комбинации двух способов активного и пассивного приоритетов общее число вариантов моделирования составило шесть.

1. Базовая модель.
2. Создание выделенной полосы для автобусов за счет уменьшения количества полос для личного автотранспорта с трех до двух в одном направлении.
3. «Продление зеленого сигнала». При приближении к перекрестку автобуса, который не успевает пересечь стоп-линию на разрешающем светофоре.
4. «Раннее включение зеленого сигнала».

Если в очереди перед стоп-линией по двум подходам одного направления шесть автобусов на приоритетном направлении, фаза с разрешающим данным направлением включается раньше.

5–6. Комбинация выделенной полосы для автобусов и способов «Продление зеленого» и «Раннее включение» соответственно.

Во всех вариантах моделирования длительность цикла остается постоянной, что позволяет сохранить сетевое координированное управление

светофорными объектами. Максимальное изменение длительности разрешающего такта в адаптивном управлении светофором составляет 25% от их максимальной длительности. Эффект от применения различных способов приоритета автобусам оценивался по изменению средних времени задержки и скорости движения при различной интенсивности движения транспортных средств, в т. ч. и автобусов (рис. 5).

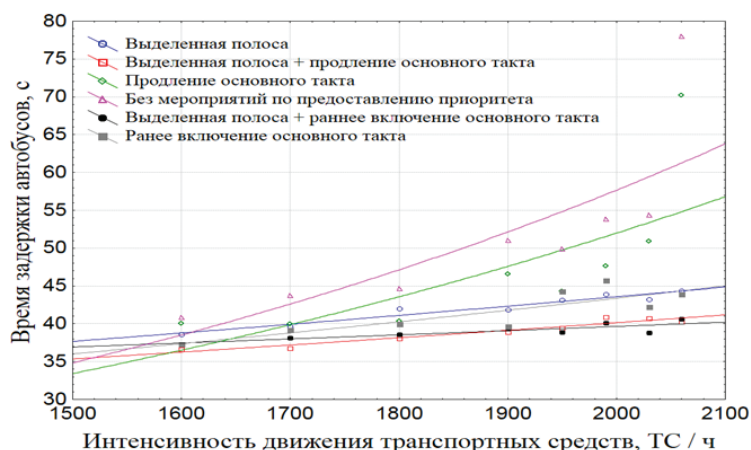


Рисунок 5. Влияние интенсивности движения на суммарное время задержки автобусов при различных способах приоритета общественному транспорту

Источник: разработано авторами

С увеличением интенсивности движения во всех шести вариантах модели время задержки автобусов увеличивается. Наибольшее увеличение времени задержки при увеличении интенсивности движения наблюдается в базовом варианте без мероприятий приоритета. Наименьшее влияние интенсивности движения транспортных средств на время задержки автобусов наблюдается в комбинированном варианте 6. При небольшой интенсивности движения время задержки при применении приоритета автобусам при проезде перекрестков снижается на 11%. Существенно больший эффект отмечается при большей интенсивности движения – время задержки снижается с 78 до 40 с (на 94%).

Из пяти вариантов приоритета общественному транспорту наибольшее влияние интенсивности движения на время задержки автобусов отмечается для способа «Продление зеленого» (увеличение на 75%). Влияние интенсивности движения на время задержки личного автотранспорта аналогично зависимостям для общественного транспорта. При этом, применение способа приоритета, при котором был наилучший эффект для автобусов, приводит к наибольшим ухудшениям для личного автотранспорта (рис. 6).

При небольшой интенсивности движения время задержки автомобилей при применении приоритета

автобусам при проезде перекрестков практически не изменяется (изменения в пределах 6%). Существенно больший эффект отмечается при большей интенсивности движения – время задержки автомобилей изменяется со 128 до 238 с (на 85%).

Влияние интенсивности движения на время задержки автомобилей при использовании различных методов активного приоритета обратно пропорционально влиянию на время задержки автобусов. Наименьшее ухудшение параметров при высокой интенсивности дорожного движения отмечается при использовании способа «Продление зеленого» (увеличение времени задержки автомобилей на 28%) по сравнению с базовым вариантом. Для сравнения, использование выделенной полосы для автобусов приводит к увеличению времени задержки личного автотранспорта на 84%.

При высокой интенсивности движения автобусов способ «Раннее включение» приводит к большим потерям времени, чем способ «Продление зеленого». Это обусловлено увеличением количества срабатываний в алгоритме условия предоставления приоритета автобусам и остановок транспортных средств на второстепенном направлении. С ростом интенсивности движения автобусов происходит увеличение средней скорости движения транспортных средств, движущихся по основному направле-

нию (с 40 до 47 км/ч) и снижение для транспортных средств на второстепенном (с 28 до 6 км/ч) за счет изменения фазовых коэффициентов по направлениям (рис. 7).

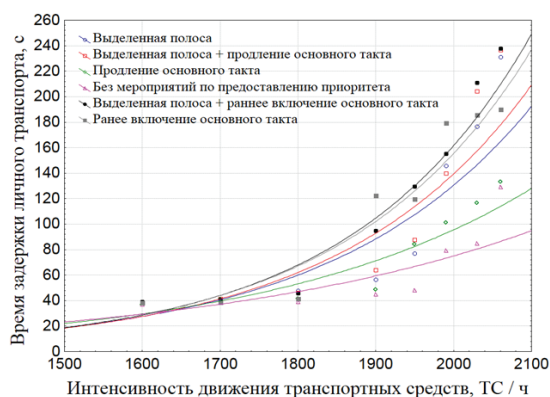


Рисунок 6. Влияние интенсивности движения на суммарное время задержки легковых автомобилей при различных способах приоритета общественному транспорту

Источник: разработано авторами

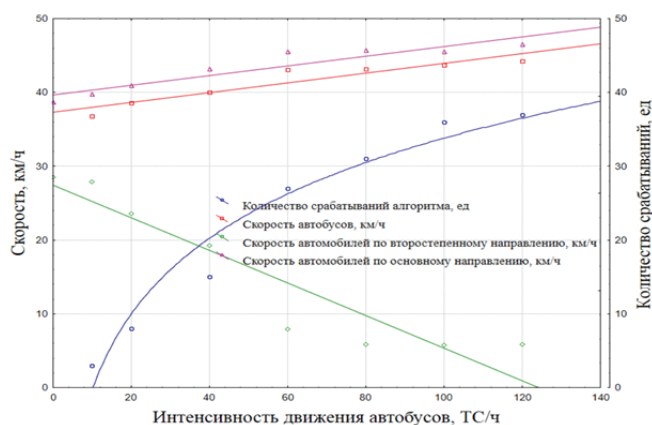


Рисунок 7. Изменение скорости движения транспорта при применении способа «Раннее включение зеленого»

Источник: разработано авторами

Для достижения целевой функции $T_s \rightarrow \min$ важно учитывать не только время задержки по видам транспорта, но и общее время задержки, учитывающее количество пассажиров в транспортном средстве.

Так как оперативно в течение дня можно управлять только активными способами предоставления приоритета, а полоса для маршрутных средств имеет постоянные значения параметров, то далее в работе рассматриваются активные способы приоритета. Двухфакторные зависимости общего времени задержки от интенсивности движения личного и общественного транспорта для двух способов активного приоритета представлены на рис. 8. Общее время задержки определялось при условии среднего количества пассажиров в общественном транспорте – 30 чел. и 3 чел. в двух личных автомобилях.

Использование способа «Продления зеленого» позволяет снизить общее время задержки на 3,2%

при высокой интенсивности движения автомобилей (1900 ТС/ч) и малом количестве автобусов (40 ТС/ч) (рис. 8а) и дает больший эффект, чем полоса для маршрутных транспортных средств (ухудшение на 147,8%).

При большом количестве автобусов 120 ТС/ч данный способ не дает значительного эффекта по сравнению с базовым вариантом. Способ «Ранний зеленый» при максимальной интенсивности движения автомобилей и автобусов дает максимальное снижение времени задержки автобусов (22%) по сравнению с «Продлением зеленого» (6%) (рис. 5). Однако общее время задержки всех участников движения при применении способа «Ранний зеленый» наибольшее среди рассматриваемых способов (рис. 8б). Таким образом, можно сделать вывод о различных областях рационального использования способов приоритета автобусам при проезде перекрестков.

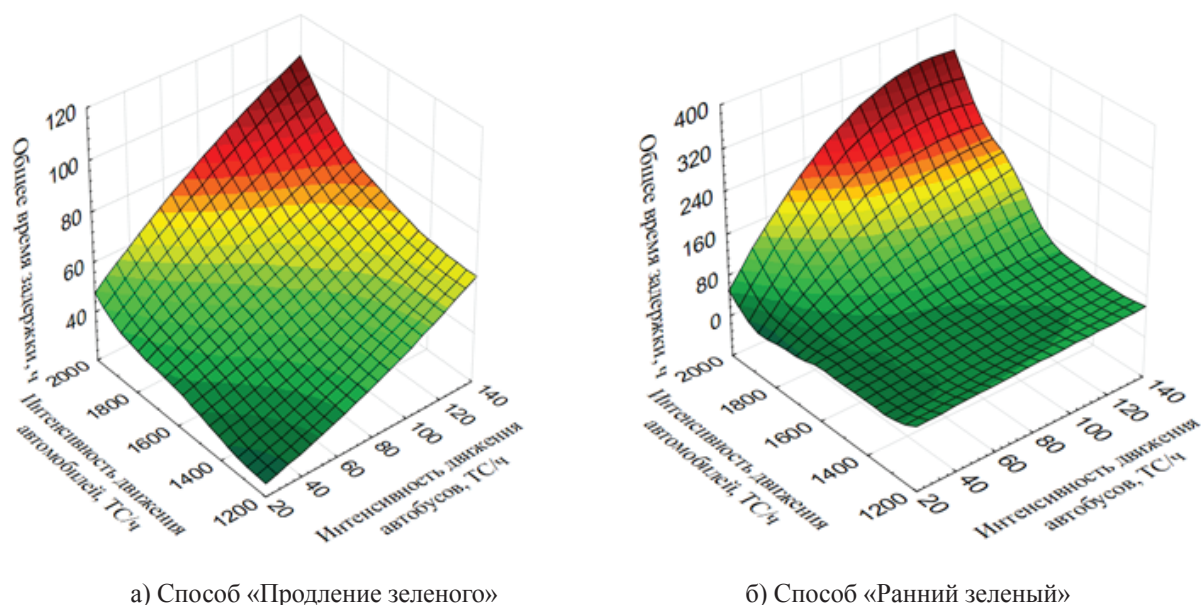


Рисунок 8. Влияние интенсивности движения автобусов и автомобилей на общее время задержки при 30 пассажирах в автобусе

Источник: разработано авторами

Заключение

Научная новизна исследования заключается в установлении зависимостей средней скорости движения автобуса на подходе к перекрестку от момента до окончания разрешающего сигнала светофора, времени задержки автобусов от количества и момента остановки автобусов при проезде перекрестка.

Применение единственного способа предоставления приоритета ОТ в течение суток не позволяет получить максимальный эффект для отдельных периодов времени. При этом, реализация одного способа упрощает и ускоряет процесс принятия решения о его выборе, реализации и управлении. Дифференциация способов предоставления приоритета ОТ во времени позволяет получить наимень-

шие потери времени на передвижение для каждого периода времени. При этом усложняется процесс создания и управления транспортной системой. Реализация концепции приоритета общественному транспорту, в том числе за счет создания приоритета проезда перекрестков, должна учитывать географические особенности города, уровень развития улично-дорожной и маршрутной сетей, структуру транспортной подвижности населения и другие факторы.

Полученные результаты будут в дальнейшем применены в качестве основы при разработке методики определения области рационального использования способов приоритета наземному городскому транспорту для линейных объектов УДС.

Литература

1. Агуреев И. Е., Ахромешин А. В. Подходы к формализации понятия транспортного поведения населения городских агломераций // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2021. – № 2. – С. 60–70. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2021-2-60>.
2. Булавина Л. В., Мухаметгалиева А. Р. Совершенствование автобусного сообщения в городе как средство решения транспортных проблем // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – 2020. – № 2(13). – С. 73–85.
3. Жанказиев С. В., Воробьев А. И., Бичманов М. Д. Оптимизация адаптивного управления светофорными объектами в рамках директивного управления транспортными потоками // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2016. – № 4(47). – С. 138–143.
4. Занозина Н. М., Шаров М. И. К вопросу о разработке критериев эффективности внедрения приоритета общественного транспорта в крупных городах // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2014. – № 6(11). – С. 103–108.
5. Нестеренко Д. Х. Исследование влияния структуры автотранспортного потока на эффективность использования участка улично-дорожной сети // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2019. – № 1. – С. 90–96. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2019-1-90>.

6. Солодкий А. И. Развитие интеллектуальных транспортных систем в России: проблемы и пути решения. Новый этап // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2020. – № 6. – С. 10–19. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2020-6-10>.
7. Фадюшин А. А., Захаров Д. А. Влияние параметров полосы для маршрутных транспортных средств на время задержки индивидуального и общественного транспорта // Вестник гражданских инженеров. – 2021. – № 4. – С. 169–177. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2021-18-1-169-177>.
8. Якунина Н. В., Нестеренко Д. Х., Арсланов М. А. Факторный анализ направлений повышения активности использования городского пассажирского автомобильного транспорта // Вестник МГТУ. – 2018. – Т. 21. – № 4. – С. 533–540. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2018-21-4-533-540>.
9. Desta R., Tóth J. (2021) Simulating the performance of integrated bus priority setups with microscopic traffic mockup experiments. *Scientific African*. Vol. 11, e00707. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00707>. (In Eng.).
10. Díaz G. et al (2020) An Intelligent Transportation System to control air pollution and road traffic in cities integrating CEP and Colored Petri Nets. *Neural Computing and Applications*. Vol. 32(2), pp. 405–426. <https://doi.org/10.1007/s00521-018-3850-1>, (In Eng.).
11. Dumbliauskas V., Grigonis V., Vitkienė J. (2017) Estimating the effects of public transport priority measures at signal controlled intersections. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. Vol. 12(3), pp. 187–192. <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2017.23>. (In Eng.).
12. Gandia R. M. et al (2021) Willingness to use MaaS in a developing country. *International Journal of Transport Development and Integration*. Vol. 5(1), pp. 57–68. doi:10.2495/TDI-V5-N1-57-68. (In Eng.).
13. Ghanbarikarekani M. et al. (2018) Minimizing the Average Delay at Intersections via Presignals and Speed Control. *Journal of Advanced Transportation*. 4121582. <https://doi.org/10.1155/2018/4121582>. (In Eng.).
14. He H., Guler S. I., Menendez M. (2016) Adaptive control algorithm to provide bus priority with a pre-signal. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. Vol. 64, pp. 28–44. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.01.009>. (In Eng.).
15. Novačko L. et al (2021) Simulation-based public transport priority tailored to passenger conflict flows: A case study of the city of Zagreb. *Applied Sciences (Switzerland)*. Vol. 11(11), 4820. <https://doi.org/10.3390/app11114820>. (In Eng.).
16. Stanley J. (2006) SmartBus: A new service standard. *Public Transport International*. Vol. 55(6), pp. 28–31. (In Eng.).
17. Sun Y. et al (2021) Tandem design of bus priority based on a pre-signal system. *Sustainability (Switzerland)*. Vol. 13(18), 10109. <https://doi.org/10.3390/su131810109>. (In Eng.).
18. Zhang H. et al (2020) Pre-Control Strategies for Downstream Bus Service Reliability with Traffic Signal. *IEEE Access*. Vol. 8, 9165725, pp. 148853–148864. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3015982>. (In Eng.).
19. Wahlstedt J. (2011) Impacts of bus priority in coordinated traffic signals. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. Vol. 16, pp. 578–587. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.04.478>. (In Eng.).

References

1. Agureev, I. E., Akhromeshin, A. V. (2021) [Approaches to formalizing the concept of transport behavior of the population of urban agglomerations]. *Интеллект. Инновации. Инвестиции* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 2, pp. 60–70. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2021-2-60>. (In Russ.).
2. Bulavina, L. V., Mukhametgalieva, A. R. (2020) [Transit service in the city as means of solving transport problemsimproving bus]. *Gilishnoe khozyaistvo i kommunalnaya infrastruktura* [Housing and Utilities Infrastructure]. Vol. 2(13), pp. 73–85. (In Russ.).
3. Zhankaziev, S. V., Vorobyov, A. I., Bachmanov, M. D. (2016) [Optimization of adaptive control of traffic lights within the traffic control] *Vestnik Moskovskogo avtomobilno-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)* [Bulletin of MADI]. Vol. 4(47), pp. 138–143. (In Russ.).
4. Zanozina, N. M., Sharov M. I. (2014) [Working out the efficiency criteria of implementing the priority of public transport at the crossroad]. *Izvestiya vuzov. Investicii. Stroitelstvo. Nedvizhimost* [Proceedings of universities investment. Construction. Real estate]. Vol. 6 (11), pp. 103–108. (In Russ.).
5. Nesterenko, D. K. (2019) [Investigation of the influence of the structure of motor traffic on the efficiency of the use of the road network section]. *Интеллект. Инновации. Инвестиции* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 1, pp. 90–96. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2019-1-90>. (In Russ.).
6. Solodkiy, A. I. (2020) [Development of intelligent transport systems in Russia: problems and solutions. New stage]. *Интеллект. Инновации. Инвестиции* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 6, pp. 10–19. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2020-6-10>. (In Russ.).
7. Fadyushin, A. A., Zakharov, D. A. (2021) [Impact of route vehicles lane parameters on the delay time

of individual and public transport]. *Vestnik Grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers]. Vol. 1(84), pp. 169–177. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2021-18-1-169-177>. (In Russ.).

8. Yakunina, N. V., Nesterenko, D. Kh., Arslanov, M. A. (2018) [Factor analysis of ways to activate using the urban passenger motor transport]. *Vestnik MGTU* [Bulletin of MSTU]. Vol. 21, No. 4, pp. 533–540. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2018-21-4-533-540>. (In Russ.).

9. Desta, R., Tóth, J. (2021) Simulating the performance of integrated bus priority setups with microscopic traffic mockup experiments. *Scientific African*. Vol. 11, e00707. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00707>. (In Eng.).

10. Díaz, G. et al. (2020) An Intelligent Transportation System to control air pollution and road traffic in cities integrating CEP and Colored Petri Nets. *Neural Computing and Applications*. Vol. 32(2), pp. 405–426. <https://doi.org/10.1007/s00521-018-3850-1>. (In Eng.).

11. Dumbliauskas, V., Grigonis, V., Vitkienė, J. (2017) Estimating the effects of public transport priority measures at signal controlled intersections. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. Vol. 12(3), pp. 187–192. <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2017.23>. (In Eng.).

12. Gandia, R. M. et al. (2021) Willingness to use MaaS in a developing country. *International Journal of Transport Development and Integration*. Vol. 5(1), pp. 57–68. <https://doi.org/10.2495/TDI-V5-N1-57-68>. (In Eng.).

13. Ghanbarikarekani, M. et al. (2018) Minimizing the Average Delay at Intersections via Presignals and Speed Control. *Journal of Advanced Transportation*. 4121582. <https://doi.org/10.1155/2018/4121582>. (In Eng.).

14. He, H., Guler, S. I., Menendez, M. (2016) Adaptive control algorithm to provide bus priority with a pre-signal. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. Vol. 64, pp. 28–44. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.01.009>. (In Eng.).

15. Novačko, L. et al. (2021) Simulation-based public transport priority tailored to passenger conflict flows: A case study of the city of Zagreb. *Applied Sciences (Switzerland)*. Vol. 11(11), 4820. <https://doi.org/10.3390/app11114820>. (In Eng.).

16. Stanley, J. (2006) SmartBus: A new service standard. *Public Transport International*. Vol. 55(6), pp. 28–31. (In Eng.).

17. Sun, Y. et al. (2021) Tandem design of bus priority based on a pre-signal system. *Sustainability (Switzerland)*. Vol. 13(18), 10109. <https://doi.org/10.3390/su131810109>. (In Eng.).

18. Wahlstedt, J. (2011) Impacts of bus priority in coordinated traffic signals. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 16, pp. 578–587. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.04.478>. (In Eng.).

19. Zhang, H. et al. (2020) Pre-Control Strategies for Downstream Bus Service Reliability with Traffic Signal. *IEEE Access*. Vol. 8, 9165725, pp. 148853–148864. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3015982>. (In Eng.).

Информация об авторах:

Дмитрий Александрович Захаров, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой эксплуатации автомобильного транспорта, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

ORCID ID: 0000-0001-9594-9144

e-mail: zaharovda@tyuiu.ru

Анатолий Викторович Писцов, младший научный сотрудник, заведующий лабораториями кафедры эксплуатации автомобильного транспорта, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

ORCID ID: 0000-0003-1624-7262

e-mail: pistsovav@tyuiu.ru

Вклад соавторов:

Захаров Д. А. – анализ ранее выполненных работ, теоретические исследования и установление зависимости и параметров математической модели времени задержки от количества и момента остановки автобусов на подходе к перекрестку, разработка математических моделей.

Писцов А. В. – анализ ранее выполненных работ, экспериментальные исследования, проведение имитационного моделирования и установление зависимости общего времени задержки с учетом количества пассажиров в общественном транспорте от интенсивности движения автомобилей и автобусов, оценка адекватности математических моделей.

Статья поступила в редакцию: 12.05.2022; принята в печать: 15.06.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Information about the authors:

Dmitrii Aleksandrovich Zakharov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Road transport operation department, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

ORCID ID: 0000-0001-9594-9144

e-mail: zaharovda@tyuiu.ru

Anatoly Victorovich Pistsov, junior researcher, head of laboratories of the road transport operation department, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

ORCID ID: 0000-0003-1624-7262

e-mail: pistsovav@tyuiu.ru

Contribution of the authors:

Zakharov D. A. – analysis of previous work, theoretical research and establishing the dependence and parameters of the mathematical model of the delay time on the number and moment of stopping buses on the way to the intersection, the development of mathematical models.

Pistsov A. V. – analysis of previous work, experimental studies, simulation modeling and establishing the dependence of the total delay time, taking into account the number of passengers in public transport, on the traffic intensity of cars and buses, assessing the adequacy of mathematical models.

The paper was submitted: 12.05.2022.

Accepted for publication: 15.06.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.